

ИОФ РАН

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

119991, ГСП-1, Москва, ул.Вавилова, 38; Тел: (499) 503-87-34; Факс: (499) 503-87-23;

E-mail: office@gpi.ru; https://www.gpi.ru;

ОКПО 02700457; ИНН 7736029700; КПП 773601001.



“УТВЕРЖДАЮ”

Директор ИОФ РАН

Член-корреспондент РАН

С.В. Гарнов

11

2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу **Лаврентьева Сергея Юрьевича**

«Газодинамические явления в непрерывном и импульсно-периодическом
оптических разрядах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости газа и плазмы»

Диссертационная работа Лаврентьева С. Ю. посвящена исследованию эффектов свободной и вынужденной конвекции в инертных газах высокого давления и некоторых жидкостях при возбуждении в них оптических разрядов под действием как непрерывного, так и импульсно-периодического лазерного излучения ближнего ИК диапазона. Исследовано также влияние возникающих потоков газа на стабильность оптических разрядов.

Рассматриваемые в работе виды оптических разрядов представляют собой непрерывные и импульсно-периодические разряды с частотой повторения единицы или десятки килогерц – то есть разряды стационарного типа, для которых имеет смысл ставить вопрос о стабильности характеристик в случае непрерывных разрядов и в течение большого количества импульсов в случае импульсно-периодических. Разряды такого типа могут сохранять стабильность при интенсивности излучения значительно ниже требуемой для оптического пробоя газа в однократном импульсе, и для инициирования требуют создания

затравочной плазмы с помощью внешнего источника. Нарушение стабильности таких разрядов, например, при взаимодействии с потоками плазмообразующего газа, кроме дестабилизации плазмы может приводить к их погасанию. Поэтому вопросы стабильности приобретают для разрядов такого типа существенное значение.

Актуальность темы обусловлена тем, что в настоящее время оптические разряды стационарного типа находят все более широкое применение, в частности, в плазменных источниках излучения высокой яркости. Эта тенденция, с одной стороны, вызвана появлением и развитием новых типов лазеров, таких как диодные и волоконные лазеры коротковолнового ИК-диапазона или импульсно-периодические лазеры ультракоротких импульсов с высокой средней мощностью. С другой стороны, оптические разряды как физический объект имеют целый ряд свойств, интересных для применений: малые размеры плазмы при высокой температуре и высокой яркости в широком спектральном диапазоне от вакуумного ультрафиолета до инфракрасного диапазона.

Поскольку оптические разряды, поддерживаемые излучением ближнего ИК-диапазона, исследованием которых ограничена диссертация, представляют собой компактные объекты с высокой плотностью диссипации энергии лазерного излучения, они вызывают возмущения в плазмообразующей среде, которые приводят к образованию течений, способных как нарушать, так и сохранять стабильность разряда.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во **введении** сформулированы цели и задачи диссертации в отношении исследуемого круга физических явлений.

В **первой главе** дан обзор опубликованных работ по теме диссертации и определены направления исследований. Отмечено, что применения оптических разрядов, предъявляющие повышенные требования к стабильности характеристик плазмы, требуют глубокого исследования факторов, влияющих на стабильность и повторяемость непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов.

Во **второй главе** описаны применяемые в диссертации приборы и установки, с одной стороны, предназначенные для поддержания непрерывных и импульсно-периодических оптических разрядов как объекта исследования и, с другой стороны, созданные для визуализации течений и областей с градиентами коэффициента преломления, например, теневые приборы с камерами скоростной съемки. Для создания и поддержания оптических разрядов автор использует как высокоэффективные диодные лазеры, работающие в непрерывном и импульсно-периодическом режиме, а также импульсно-периодический лазер с длительностью импульсов субпикосекундного (близкого к фемтосекундному) диапазона. Все эти типы лазеров могут использоваться для генерации плазмы в плазменных источниках излучения. Для визуализации градиентов температуры в окрестности оптических разрядов использовались теневые приборы с близким к точечному источнику излучения на непрерывном оптическом разряде,

обеспечивающим достаточно высокую для непрерывной скоростной съемки яркость широкополосного излучения в окрестности оптических разрядов.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию неустойчивости свободной (термогравитационной) конвекции вокруг непрерывного оптического разряда в ксеноне при повышенном давлении. Прямыми измерениями, а также сравнением экспериментальных данных с результатами математического моделирования процесса конвекции показано, что исследуемая неустойчивость не связана с возможными плазменными колебаниями и имеет гидродинамическую природу, родственную природе пульсаций химических пламен, поскольку описывается тем же соотношением подобия, связывающим характерную частоту пульсаций с размерами конвективного факела. От известных случаев пульсирующих пламен оптический разряд отличается тем, что реализуется при более высоком давлении, обуславливающим малые размеры конвективного факела и, соответственно, более высокую частоту пульсаций на уровне нескольких десятков герц.

В четвертой главе исследуется неустойчивость непрерывного оптического разряда с импульсно-периодической модуляцией вклада энергии в плазму, при которой при определенных частотах повторения в замкнутом разрядном объеме возникают резонансные акустические колебания большой амплитуды. Резонансные колебания порождают акустические потоки, о возникновении и интенсивности которых можно судить по их действию на область разряда и конвективные течения вокруг разряда.

В пятой главе описано исследование квазистационарных газовых потоков, создаваемых в камере с аргоном высокого давления при оптическом разряде в фокусе импульсно-периодического лазерного излучения субпикосекундной длительности. Мощность в импульсе достигала 1 ГВт, а интенсивность при фокусировке внеосевым параболическим зеркалом составляла до 10^{15} Вт/см², что примерно на два порядка превышало порог многофотонной ионизации на длине волны лазера около 1 мкм. В таких условиях при частоте повторения импульсов свыше 1 кГц возникал стационарный поток газа навстречу лазерному лучу, который представлял собой сумму микропотоков, генерируемых при каждом отдельном импульсе в результате асимметричного коллапса области диссипации энергии. При изменении формы области энерговыделения за счет, например, небольшой разъюстировки фокусирующего зеркала, предсказуемо изменялась интенсивность и направление генерируемого потока. При определенных условиях поток можно было направить практически в любом направлении под углом или перпендикулярно оптической оси лазерного излучения.

В шестой главе изложены результаты исследования квазистационарных направленных потоков, возникающих в жидкостях при воздействии импульсно-периодического лазерного излучения фемтосекундной длительности. Жидкости различались коэффициентом поглощения лазерного излучения, коэффициентом преломления и проявляемой степенью оптической нелинейности в поле интенсивного лазерного излучения. Направление и интенсивность генерируемых потоков в этом случае отличались в зависимости от степени самофокусировки лазерного излучения в жидкости. За исключением фактора самофокусировки

эффекты генерации направленных потоков в жидкости имели общие черты с эффектами, наблюдавшимися с тем же лазером в аргоне повышенного давления, что указывает на схожесть механизмов генерации потоков в обоих случаях.

Следует отметить **новые результаты**, полученные в диссертационной работе Лаврентьева С.Ю.:

1. Использование непрерывного оптического разряда в качестве точечного источника излучения высокой яркости в схемах теневой визуализации градиентных областей позволило повысить чувствительность при достаточно высоком временном разрешении при непрерывной скоростной съемке.

2. Для конвективных пульсаций непрерывного оптического разряда получено соотношение подобия, связывающее частоту пульсаций с радиусом конвективного факела. Установлено, что оно совпадает с аналогичным соотношением для пульсирующих пламен.

3. При возбуждении импульсно-периодического оптического разряда в ограниченном объеме газа обнаружена его неустойчивость, возникающая при возбуждении резонансных акустических колебаний указанного объёма. Установлено, что такого рода неустойчивость, связанная с генерацией потоков газа под действием акустических колебаний, может в зависимости от частоты повторения импульсов как дестабилизировать оптический разряд вплоть до погасания, так и стабилизировать его с подавлением конвективных пульсаций.

4. Получены и исследованы направленные потоки газа из зоны диссипации энергии, образуемой в сфокусированном луче импульсно-периодического субпикосекундного лазера, интенсивность и направление которых определяются формой области диссипации энергии; предложен способ управления направлением индуцируемых газовых потоков путем настройки оптики, фокусирующей лазерное излучение.

5. Получены и исследованы направленные потоки в жидкостях под действием излучения фемтосекундного импульсно-периодического лазера, направление и форма которых зависит от формы области диссипации энергии, аналогично случаю потоков в газах высокого давления; наблюдаемые отличия обусловлены эффектами самофокусировки, не проявляющимися в газах; общие черты поведения потоков указывают на сходные динамические механизмы генерации струйных течений под действием фемтосекундных импульсов в газах и жидкостях.

Достоверность результатов исследования не вызывает сомнений. Работа отличается разнообразием применяемых методов регистрации параметров исследуемых потоков и лазерного излучения, широкого использования методов математического моделирования и соответствия результатов измерений теоретическим оценкам. Чувствительность, а также пространственная и временная разрешающая способность применяемой аппаратуры была достаточной для того, чтобы сделать качественные и количественные выводы о структуре исследуемых течений. Полученные результаты согласуются с опубликованными в научной литературе результатами исследований других авторов смежной тематики.

Вместе с тем, по диссертационной работе можно сделать ряд замечаний.

1. В диссертации содержится утверждение, что «в ... коротковолновом УФ диапазоне практически нет источников излучения, по яркости сравнимых с оптическими разрядами» (стр.23 диссертации). Предварительно необходимо было бы провести сравнение параметров оптического разряда с параметрами современных источников излучения широкополосного спектра на основе нелинейных явлений в волоконных световодах (суперконтинуум) и также с синхротронным излучением.

2. На графиках спектральной яркости излучения оптических разрядов на рис.2.7 (стр. 49) и на рис.2.4 (стр. 43) диссертации указаны различные единицы спектральной яркости, не согласующиеся между собой.

3. При описании лазерного излучения, поддерживающего оптический разряд, в большинстве случаев отсутствуют параметры, которые позволили бы хотя бы оценить интенсивность лазерного излучения и характерный размер пятна излучения в области разряда. Данное обстоятельство в ряде случаев ограничивает применимость полученных результатов.

4. При описании колебаний яркости оптического разряда на рис.3.3 (стр. 61) приведена покадровая теневая развертка оптического разряда, снятая в темном поле, а соответствующая схема эксперимента на рис.3.2 – для съемки в светлом поле.

5. Требуется пояснения утверждение, сделанное на стр. 100 диссертации: «Звуковая волна будет излучаться, когда поверхность самой плазмы начнет двигаться пропорционально изменению линейных размеров плазмы, а не ее объема».

Высказанные замечания, тем не менее, не являются принципиальными и не снижают общей оценки диссертационной работы.

Научные положения, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы и не вызывают сомнений. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, известны широкому кругу специалистов и получили достаточную апробацию на Всероссийских и международных научных конференциях.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Следует также отметить **практическое значение** диссертационной работы.

Поскольку исследованные в диссертации новые явления генерации струйных течений непрерывными и импульсно-периодическими оптическими разрядами различных типов оказывают как дестабилизирующее, так и стабилизирующее влияние на процессы выделения энергии в оптических разрядах, полученные результаты могут быть использованы, в частности, для управления генерацией потоков с целью воздействия на разряд.

Можно рекомендовать к дальнейшему развитию метод теневой визуализации с плазмой непрерывного оптического разряда в качестве близкого к точечному источника излучения высокой яркости, позволивший автору получить качественные теневые изображения при скоростной видеосъемке.

Результаты по генерации потоков в жидкостях могут найти применение в лазерных технологиях с использованием жидкой среды.

Результаты диссертации могут служить основой для совершенствования и дальнейшего развития источников широкополосного излучения высокой яркости на оптических разрядах.

Результаты, полученные в диссертации, будут полезны в организациях, занимающихся исследованиями, разработками и применением генераторов плазмы на оптических разрядах, таких как ОИВТ РАН, ИПЛИТ РАН, Институт спектроскопии РАН, ИОФ РАН, ИТПМ СО РАН, ИЛФ СО РАН, ТРИНИТИ, Физический институт РАН, ИАиЭ СО РАН и других.

В заключение можно отметить, что рассмотренная диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему. Ее автор Лаврентьев С.Ю. обнаружил и исследовал ряд новых явлений, связанных с генерацией потоков непрерывными и импульсно-периодическими оптическими разрядами и воздействием этих потоков на устойчивость плазмы оптических разрядов.

Считаем, что диссертация отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Лаврентьев Сергей Юрьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – «Механика жидкости, газа и плазмы».

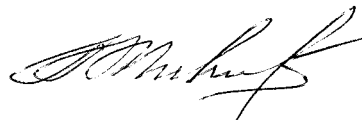
Научный доклад Лаврентьева С.Ю. по диссертации заслушан и одобрен на Научном семинаре им. чл.-корр. РАН П.П. Пашинина отдела Взаимодействия когерентного излучения с веществом ИОФ РАН 24 ноября 2021 года.

И.о. Главного научного сотрудника ИОФ РАН
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН



И.А. Буфетов

Заведующий лабораторией
Газоразрядных лазеров ИОФ РАН
к.ф.-м.н.



А.П. Минеев

СВЕДЕНИЯ
о ведущей организации

по диссертации Лаврентьева Сергея Юрьевича на тему «Газодинамические явления в непрерывном и импульсно-периодическом оптических разрядах»
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»
Сокращенное наименование организации в	ИОФ РАН
Почтовый индекс, адрес	119991, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38
Веб-сайт	https://www.gpi.ru/
Телефон	+7 (499) 503-8734 (канцелярия, общая справочная информация)
Адрес электронной почты	office@gpi.ru

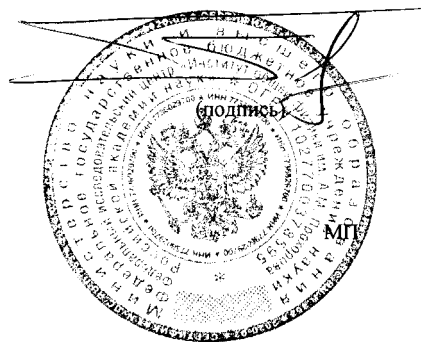
Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Буфетов И.А., Колядин А.Н., Яценко Ю.П., Косолапов А.Ф. Спектральная диагностика оптического разряда, распространяющегося по поперечному волоконному световоду // *Квантовая электроника* – 2021 – Т.51, №3 – С. 232–239
2. Кононенко В.В., Гололобов В.М., Кононенко Т.В., Гончаров Е.А., Конов В.И. Сравнительное исследование динамики лазерного пробоя воды и гексана с помощью интерференционной микроскопии // *Квантовая электроника* – 2021 – Т.51, №2 – С. 169–174
3. Valery V. Smirnov, Margarita I. Zhilnikova, Ekaterina V. Barmina, Georgy A. Shafeev, Vitaly D. Kobtsev, Sergey A. Kostritsa, Svetlana M. Pridvorova Laser fragmentation of aluminum nanoparticles in liquid isopropanol // *Chemical Physics Letters* – 2021 – V. 763, 138211.
4. Заведеев Е.В., Кононенко В.В., Гололобов В.М., Конов В.И. Моделирование фемтосекундной интерферометрии при исследовании воздействия интенсивного лазерного излучения на прозрачную среду // *Квантовая электроника* – 2020 – Т.50, №2 – С. 175–178

5. *А.Н. Колядин, А.Ф. Косолапов, И.А. Буфетов* Распространение оптического разряда по волоконным световодам с полой сердцевиной // *Квантовая электроника* – 2018 – Т.48, №12 – С. 1138–1142
6. *П.А. Чижов, В.В. Букин, А.А. Ушаков, С.В. Гарнов* Особенности динамики электронной плотности при филаментации фемтосекундного лазерного излучения в воздухе при повышенном давлении // *Квантовая электроника* – 2016 – Т.46, №4 – С. 332–334
7. *А.А. Антипов, С.М. Аракелян, С.В. Гарнов, С.В. Кутровская, А.О. Кучерик, Д.С. Ногтев, А.В. Осипов* Лазерная абляция углеродных мишеней, помещенных в жидкость // *Квантовая электроника* – 2015 – Т.45, №8 – С. 731-735
8. *P.G. Kuzmin, G.A. Shafeev, A.A. Serkov, N.A. Kirichenko, M.E. Shcherbina* Laser-assisted fragmentation of Al particles suspended in liquid // *Applied Surface Science* – 2014 – V. 294 – pp. 15-19

Верно.

Директор ИОФ РАН,
член-корреспондент РАН



С.В.Гарнов